

ZASTOSOWANIE METODY PROCESÓW PRZEJŚCIOWYCH DO WYKRYWANIA ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW W REJONIE GRABOWNICY STARZEŃSKIEJ – HUMNISK – BRZÓZOWA

**Applying of the transient electromagnetic method to exploration
of oil and gas fields in the area of Grabownica Starzeńska –
Humniska – Brzozów**

Wojciech KLITYŃSKI¹ & Paweł TARGOSZ²

¹*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska; al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: gpklityn@geol.agh.edu.pl*

²*TARGEO; ul. Jana Matejki 7, 34-100 Wadowice; e-mail: targosz.pawel@interia.pl*

Treść: W pracy przedstawiono charakterystykę geologiczną i geoelektryczną ośrodka geologicznego w rejonie Grabownica Starzeńska – Humniska – Brzozów w Karpatach Wschodnich na podstawie danych elektrometrii otworowej i danych geologicznych z otworów. Dla wybranych czterech otworów wiertniczych wykorzystano dane elektrometrii otworowej i obliczono krzywe syntetyczne sondowań TDEM (*Time Domain ElectroMagnetic Method*). Obliczone krzywe sondowań przeanalizowano pod względem możliwości kartowania struktur wysokooporowych, interesujących ze względu na złoża węglowodorów. Wykonano interpretację 1D krzywych sondowań TDEM zlokalizowanych wzdłuż profili przebiegających przez otwór złożowy Humniska Brzozów-7 z wykorzystaniem algorytmu Occama. Wykonano interpretację kompleksową na tych profilach pod kątem możliwości kartowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego metodą TDEM.

Słowa kluczowe: metoda procesów przejściowych, TDEM, krzywe sondowań, elektrometria otworowa, warstwa wysokooporowa, dolna kreda

Abstract: The paper presents the geologic and geoelectric characteristics of the Grabownica Starzeńska – Humniska – Brzozów area (Polish Eastern Carpathians) based on electric logs and downhole geologic data. Synthetic TDEM sounding curves were calculated based on electric log data from four boreholes from the study area. The synthetic sounding curves were analysed from the point of view of possible interpretation of high-resistivity layers that could be prospective for oil and gas exploration. The 1D Occam interpretation of chosen TDEM soundings from profiles that ran across the Humniska Brzozów-7 borehole, was performed. The integrated data interpretation was made to estimate the capability of TDEM method to map hydrocarbon deposits at the study area.

Key words: transient electromagnetic method, TDEM, sounding curves, electric log data, high-resistivity layer, Lower Cretaceous

WSTĘP

Prowadzenie pomiarów metodami elektromagnetycznymi, a w szczególności metodą procesów przejściowych, wiąże się z koniecznością wykonania szeregu analiz materiałów archiwalnych (geologicznych, sejsmicznych, złożowych, otworowych) z obszaru prac. Określenie rozkładu oporności ośrodka, przebiegu głównych granic/kierunków geoelektrycznych, głębokości wymaganego rozpoznania i optymalnej rozdzielczości jest podstawą projektowania i prowadzenia prac polowych. W artykule opisano charakterystykę geologiczną i warunki występowania złóż węglowodorów w rejonie tzw. fałdu Grabownicy na podstawie danych otworowych z otworów: Grabownica-104, Gaten-24, Genpeg-62 i Humniska Brzozów-7. Obszar ten stanowi jeden z obiektów testowych wyselekcjonowanych w ramach realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr 13102, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego – Inicjatywa Technologiczna I.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA I GEOELEKTRYCZNA OŚRODKA GEOLOGICZNEGO W REJONIE GRABOWNICA STARZEŃSKA – HUMNISKA – BRZÓZÓW

Otwór Grabownica-104 znajduje się na wschodnim przedłużeniu fałdu Grabownicy (Fig. 1). Wywiercony został w latach 1958–1969 do głębokości 1305.2 m, a jego obecna głębokość wynosi 738 m. Złoża ropy naftowej i gazu ziemnego związane są z warstwami dolnej kredy (głównie warstwy lgockie dolne, Fig. 2). Występują w obrębie warstw wysokooporowych, związanych prawdopodobnie z przewagą piaskowców w przedziałach głębokościowych 600–640 m oraz 700–820 m (wyniki elektrometrii otworowej, Fig. 2).

Otwór Humniska Brzozów-7 odwiercono w 1986 roku i osiągnięto głębokość 1135 m. Usytuowany jest na północny zachód od Grabownicy-104, w podobnych warunkach geologicznych i geoelektrycznych (Fig. 1). Głębokość otworu wynosi 971 m. Wydobycie ropy naftowej i gazu ziemnego związane jest z przedziałami głębokościowymi 838–870 m oraz 905–965 m. Złoża te, podobnie jak w otworze Grabownica-104, występują w warstwach kredy dolnej (warstwy lgockie) i są związane z warstwami wysokooporowymi (Fig. 2).

Otwór Gaten-24 znajduje się w okolicach miejscowości Grabownica Starzeńska niedaleko otworu Grabownica-104 (Fig. 1), w tych samych warunkach geologicznych. Tutaj złoża ropy naftowej i gazu ziemnego związane są z dolną partią warstw lgockich dolnych i występują na głębokości od ok. 750 do ok. 800 m. Podobnie jak w poprzednio omawianych otworach złoża te związane są ze skałami kredy dolnej (Fig. 3). W poniżej leżących (>805 m) warstwach wierzowskich, niskooporowych, nie wykryto złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Dane elektrometrii otworowej w otworze Gaten-24 są niepełne i zaczynają się od głębokości ok. 750 m do ok. 1050 m.

Otwór Genpeg-62 usytuowany jest w pobliżu miejscowości Humniska, a więc w obrębie tych samych struktur geologicznych co pozostałe otwory (Fig. 1). Wyniki elektrometrii otworowej pokazują (Fig. 3) w przedziale głębokości 460–650 m warstwę niskooporową, która jest prawdopodobnie związana z występowaniem wody zasolonej w tym obszarze.

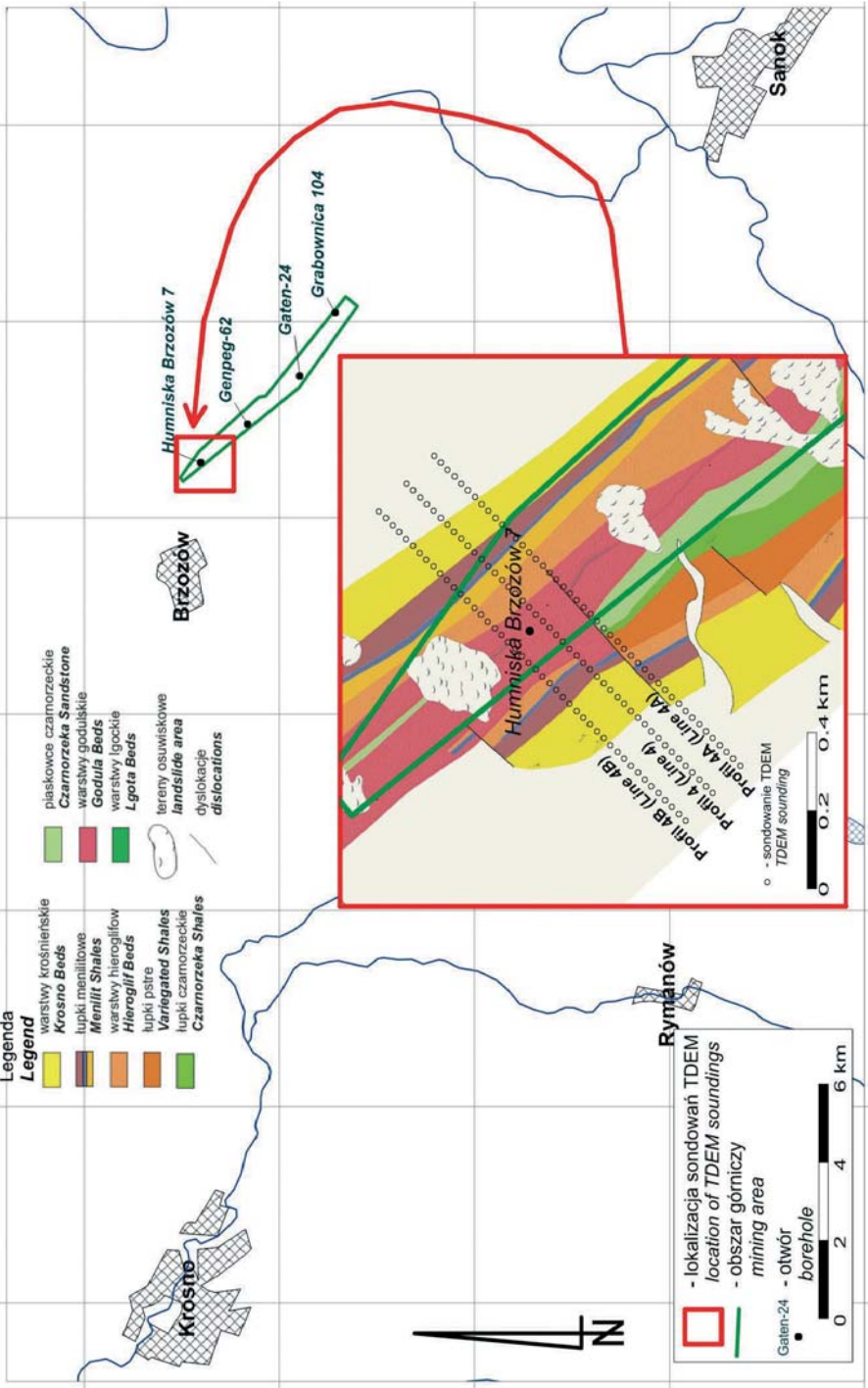


Fig. 1. Lokalizacja profili TDEM (procesów przejściowych) w rozpatrywanym obszarze Karpat
Fig. 1. Location of TDEM lines of study area in the Polish Carpathians

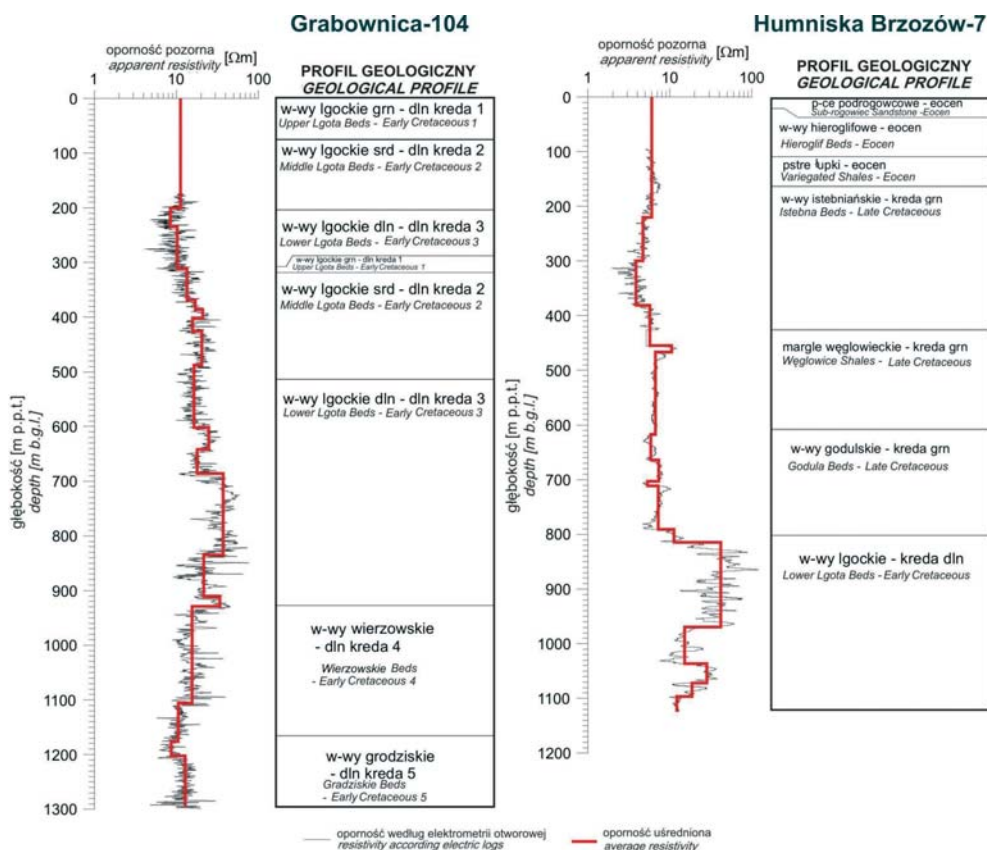


Fig. 2. Wykresy oporności uzyskane z profilowań elektrometrii otworowej oraz uproszczony profil geologiczny otworów Grabownica-104 i Humniska Brzozów-7

Fig. 2. Resistivity plots obtained from electric logs, and geological profile for boreholes Grabownica-104 and Humniska Brzozów-7

W przedziale głębokości od ok. 900 m do 1040 m występują warstwy wysokooporowe związane z łupkami z domieszką piaskowców, a poniżej 970 m – z przewagą piaskowców z domieszką łupku czarnego (oporność ośrodka rośnie). Na głębokości ok. 960 m wykryto ślady gazu, a niżej, w obrębie warstw z przewagą piaskowców (ok. 1000 m i niżej) – ślady ropy naftowej.

Jak widać, na badanym obszarze wyniki elektrometrii otworowej wskazują na to, że warstwy związane ze złożami węglowodorów są względnie wysokooporowe (od kilkudziesięciu do 100 Ω·m). Nadkład ma mniejszą oporność (od ok. 7 Ω·m do kilkunastu omometrów). W otworze Grabownica-104 oporność warstw leżących powyżej warstwy złożowej (wysokooporowej) wynosi średnio kilkanaście omometrów, w otworze Humniska Brzozów-7 – ok. 7 Ω·m, w przypadku otworu Gaten-24 jest trudna do oceny (w tym opracowaniu oporność oszacowano na kilkanaście omometrów na podstawie fragmentarycznych danych elektrometrii otworowej).

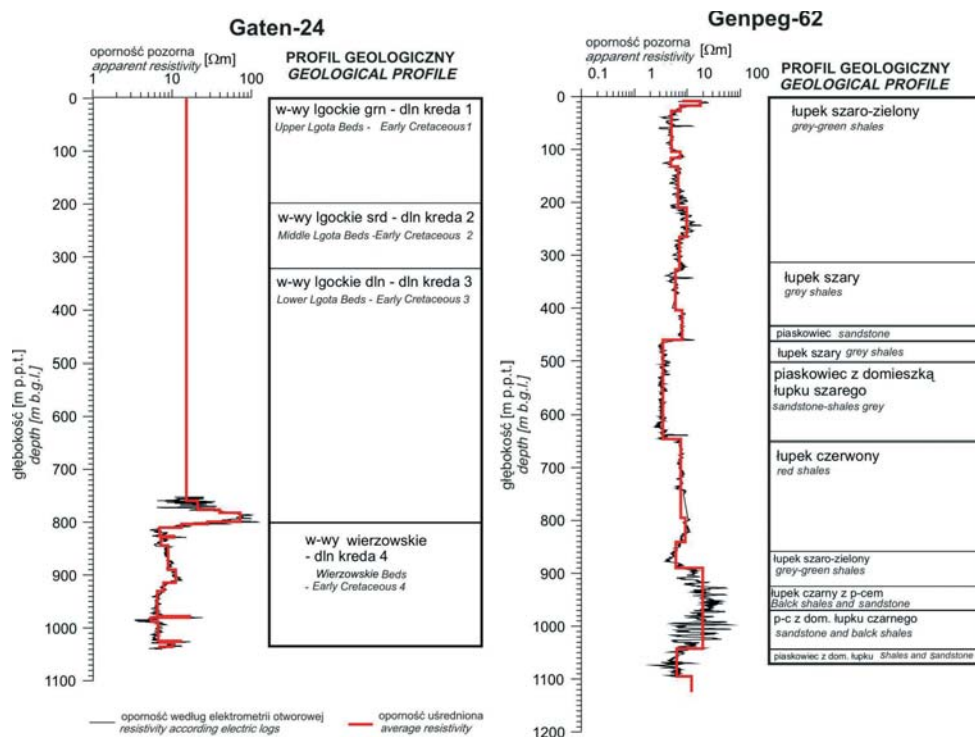


Fig. 3. Wykresy oporności uzyskane z profilowań elektrometrii otworowej oraz uproszczony profil geologiczny otworów Gaten-24 i Genpeg-62

Fig. 3. Resistivity plots obtained from electric logs, and geological profile for boreholes Gaten-24 and Genpeg-62

Średnia oporność warstw nadległych w otworze Genpeg-62 wynosi ok. $10 \Omega \cdot m$, bardzo niskooporowa warstwa (kilka omometrów, Fig. 3) w obrębie nadkładu jest spowodowana nasyceniem wodą zmineralizowaną w tym obszarze.

Poniżej warstwy wysokooporowej (o oporności ρ_2) występują utwory o oporności mniejszej (ρ_3), w związku z tym mamy do czynienia z fragmentem krzywej sondowania typu K (charakterystyka krzywej $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$), gdzie warstwa wysokooporowa to warstwa pośrednia. Z warstwą tą związana jest ekwiwalencja typu H, która polega na tym, że dla stałej miąższości warstwy pośredniej i przy założeniu, że $\rho_2 \gg \rho_3$, krzywa sondowania nie zależy od oporności ρ_2 z pewną dokładnością. Poprawne jest przyjęcie dla warstwy pośredniej oporności mniejszej niż rzeczywista, ale spełniającej założenie ekwiwalencji, że oporność warstwy pośredniej musi być wielokrotnie większa niż dla warstwy leżącej poniżej. Warstwy wysokooporowe występujące w obrębie warstw niskooporowych będą przedmiotem analizy pod względem możliwości ich wykrywania za pomocą metody procesów przejściowych. W otworze Grabownica-104 warstwy te występują na głębokości od ok. 600 m do 840 m i są przedzielone warstwą niskooporową (640–680 m), gdzie nie wykryto złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. W otworze Humniska Brzozów-7 warstwy te zalegają głębiej (od ok. 800 m do 970 m), a w otworze Gaten-24 na głębokości ok. 750–800 m, gdzie

miąższość ich jest dużo mniejsza niż w pozostałych otworach. Jeszcze głębiej zalegają te kompleksy w otworze Genpeg-62 (w przedziale 900–1050 m). Różnice w zaleganiu stropu utworów wysokooporowych wynoszą ok. 300 m.

Poniżej warstw wysokooporowych, z którymi związane jest występowanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego, w omawianym rejonie występują warstwy niskooporowe (do $10 \Omega \cdot \text{m}$). Na podstawie interpretacji danych magnetotellurycznych wiadomo, że kompleks ten w tym rejonie charakteryzuje się dużą miąższością (Stefaniuk 2003). Podłoże wysokooporowe Karpat zalega więc bardzo głęboko i znajduje się poza zasięgiem metody procesów przejściowych w rozpatrywanym zakresie czasowym.

MODELE GEOELEKTRYCZNE I KRZYWE SONDOWAŃ W METODZIE TDEM

Jak napisano w poprzednim rozdziale, w obszarze Karpat Wschodnich, w rejonie Grabownica Starzeńska – Humniska – Brzozów, głębokość zalegania pułapek ropo- i gazonośnych jest stosunkowo niewielka. Złoża węglowodorów znajdują się tutaj w warstwach wysokooporowych zalegających na głębokościach poniżej 600 m. Krzywe sondowań elektromagnetycznych w metodzie procesów przejściowych wyliczone z modeli skonstruowanych na podstawie danych otworowych obrazują możliwości tej metody w kartowaniu ww. pułapek złożowych. Obliczenia wykonane zostały dla różnych rozmiarów pętli nadawczej L (20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m i 500 m) i prądów o natężeniu odpowiednio 1 A, 5 A, 10 A, 30 A dla maksymalnego czasu rejestracji 1000 ms (Fig. 4A, 5A). Przedstawiono również krzywe dla czasów rejestracji uwzględniających możliwości techniczne aparatury firmy Phoenix Geophysics Ltd. przy założeniu średniego poziomu zakłóceń (10^{-9} V/m^2) i niskiego poziomu zakłóceń (10^{-10} V/m^2). Analiza krzywych sondowań procesów przejściowych przeprowadzona została w czterech wybranych otworach wiertniczych z tego rejonu, opisanych w poprzednim rozdziale.

Głębokość zalegania warstwy wysokooporowej w otworze Grabownica-104 wynosi ok. 680 m, a miąższość ok. 160 m. Jak widać na figurze 4A, B (z krzywych sondowań) warstwa ta zaznacza się już przy długości boku pętli nadawczej $L = 100 \text{ m}$. W celu lepszego wykartowania tej struktury (określenie głębokości i miąższości) konieczne jest wykorzystanie w pomiarach pętli nadawczej o rozmiarze 300 m (niski poziom zakłóceń, Fig. 4C), w przypadku większych zakłóceń (Fig. 4B) pętli o rozmiarze $L = 500 \text{ m}$.

W otworze Humniska Brzozów-7 głębokość zalegania struktury wysokooporowej jest duża (wynosi ok. 800 m), oporność nadkładu jest niska (średnio $7 \Omega \cdot \text{m}$), zatem wykartowanie tej warstwy jest trudne (Fig 4B). Konieczne jest tutaj wykonanie pomiarów w warunkach niskiego poziomu zakłóceń lub przy zastosowaniu pętli nadawczej dużych rozmiarów (Fig. 4C). Wówczas warstwa wysokooporowa zaznacza się dosyć dobrze (dla czasów powyżej kilkudziesięciu milisekund), określenie jej miąższości jest jednak niemożliwe (można określić natomiast głębokość zalegania stropu podłoża wysokooporowego) (Fig. 4C). Jak widać, na krzywych sondowań odpowiadających przekrojowi z otworu Humniska Brzozów-7 zaznacza się również niskooporowa warstwa występująca w przedziale głębokości 300–380 m (przy czasie od kilku do dziesięciu milisekund). Dokładne zbadanie struktury wysokooporowej może zapewnić duża pętla nadawcza o rozmiarze $L = 1000 \text{ m}$ i zastosowanym

prądzie 30 A. Wówczas maksymalny zasięg głębokościowy, możliwy do osiągnięcia przy dużym poziomie zakłóceń (10^{-8} V/m²), wynosi ok. 1010 m (Klityński & Targosz 2011, wzór (6)).

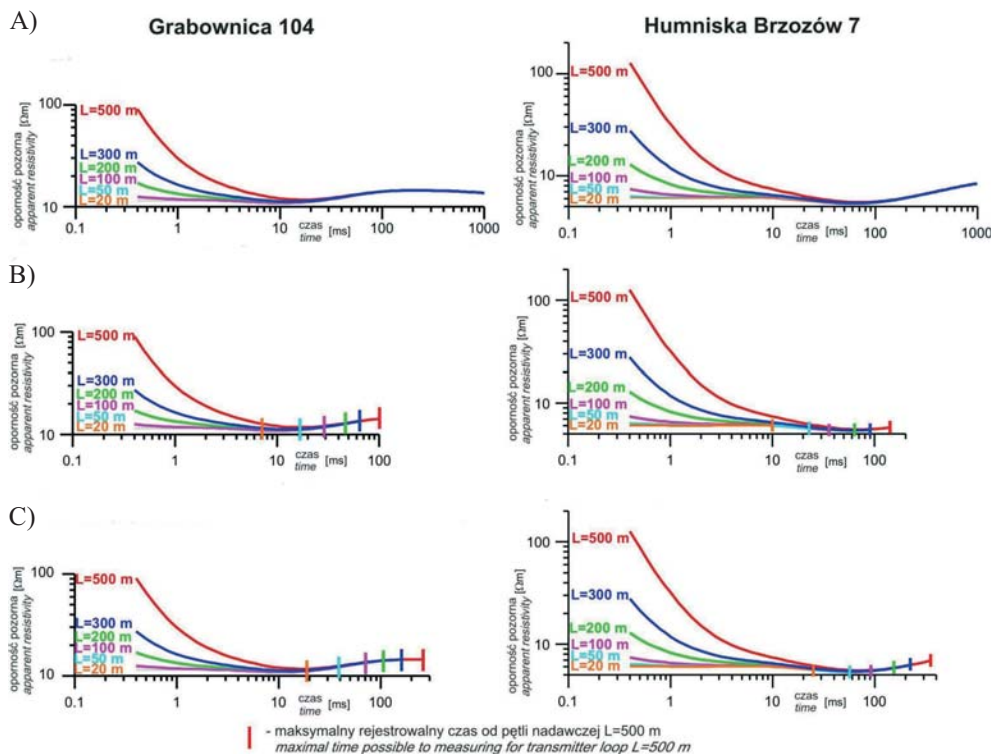


Fig. 4. Krzywe modelowe sondowań metodą procesów przejściowych przy różnych rozmiarach pętli nadawczej. Otwory Grabownica-104 i Humniska Brzozów-7: A) czasy rejestracji 1000 ms; B) czasy rejestracji przy założeniu średniego poziomu zakłóceń (10^{-9} V/m²); C) czasy rejestracji przy założeniu niskiego poziomu zakłóceń (10^{-10} V/m²)

Fig. 4. Calculated TDEM curves for different transmitter loops. Boreholes: Grabownica-104, Humniska Brzozów-7: A) for maximal time mesuring 1000 ms; B) for maximal time mesuring and medium noise level (10^{-9} V/m²); C) for maximal time mesuring and low noise level (10^{-10} V/m²)

W otworze Gaten-24 możliwości wykrycia warstwy wysokooporowej metodą procesów przejściowych są niewielkie (Fig. 5). Występuje ona na stosunkowo dużej głębokości (ok. 780 m, Fig. 3), a miąższość jej nie jest duża (kilkadziesiąt metrów). Przy założeniu najbardziej korzystnej konfiguracji (niski poziom zakłóceń i rozmiar pętli nadawczej 500 m) zasięg metody jest stosunkowo duży i wynosi ok. 1200 m (Fig. 5C). Metoda TDEM nie pozwala na wykrycie tej warstwy z uwagi na jej niewielką miąższość. Należy zaznaczyć, że dane otworowe z otworu Gaten-24 są niepełne (od głębokości 750 m) i być może nie dość dokładnie obrazują istniejącą tam sytuację geologiczną.

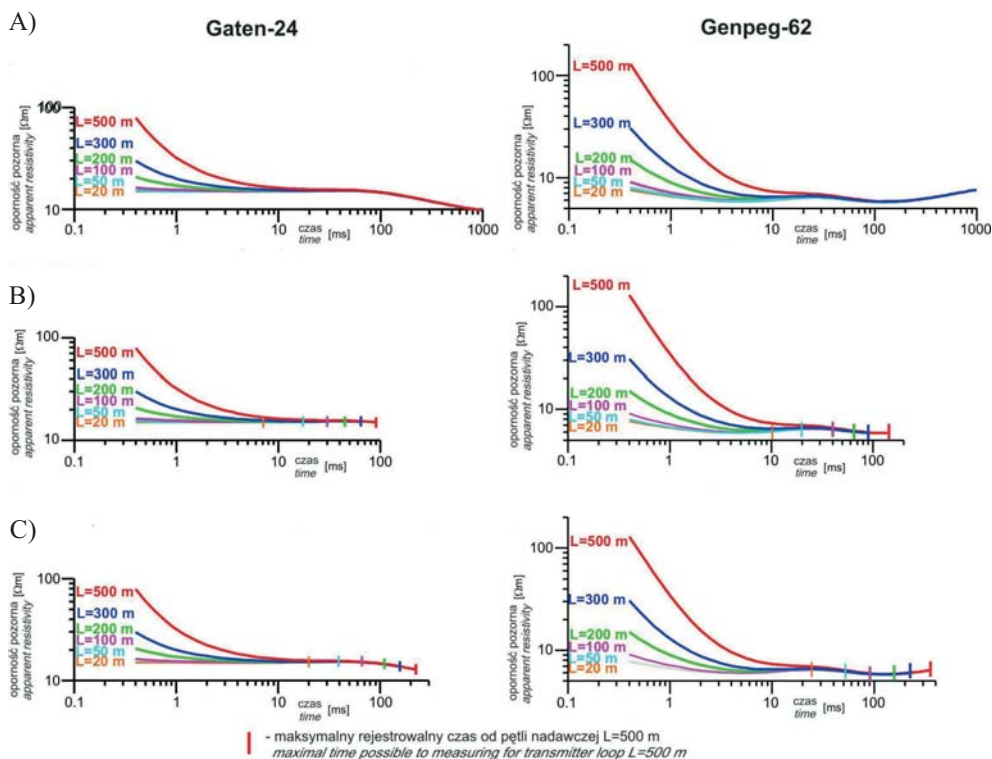


Fig. 5. Krzywe modelowe sondowań metodą procesów przejściowych przy różnych rozmiarach pętli nadawczej. Otwory Gatens-24 i Genpeg-62: A) czasy rejestracji 1000 ms; B) czasy rejestracji przy założeniu średniego poziomu zakłóceń (10^{-9} V/m²); C) czasy rejestracji przy założeniu niskiego poziomu zakłóceń (10^{-10} V/m²)

Fig. 5. Calculated TDEM curves for different transmitter loops. Boreholes: Gatens-24, Genpeg-62: A) for maximal time measuring 1000 ms; B) for maximal time measuring and medium noise level (10^{-9} V/m²); C) for maximal time measuring and low noise level (10^{-10} V/m²)

W otworze Genpeg-62 możliwości określenia stropu struktury wysokooporowej na głębokości 900 m przy użyciu pętli nadawczej o rozmiarze $L = 300$ m są ograniczone (Fig. 5).

Przy założeniu bardzo niskiego poziomu zakłóceń (10^{-10} V/m²) i użyciu dużej pętli nadawczej (np. $L = 500$ m) struktura wysokooporowa na krzywej sondowania zaznacza się dosyć wyraźnie. Przy zastosowaniu pętli nadawczej o rozmiarze $L = 1000$ m, prądu 30 A nawet przy dużym poziomie zakłóceń (10^{-8} V/m²) jest możliwe osiągnięcie zasięgu głębokościowego ok. 950 m. Określenie głębokości zalegania warstwy wysokooporowej jest więc możliwe.

Na podstawie przedstawionych krzywych sondowań metodą procesów przejściowych należy wnioskować, że zastosowanie aparatury firmy Phoenix Geophysics Ltd. w konfiguracji MuTEM (Klityński & Targosz 2011) umożliwia wykrycie warstw wysokooporowych Karpat Wschodnich, w których mogą występować złoża węglowodorów, pod warunkiem że głębokość tych warstw nie przekracza 900–1000 m. Najbardziej efektywna jest wówczas

interpretacja głębokości stropu warstwy wysokooporowej. Interpretacja miąższości tej warstwy wydaje się bardzo trudna i jest możliwa wówczas, gdy miąższość ta wynosi powyżej 150 m. Tak więc odgrywa tutaj rolę czynnik geologiczny, tj. konfiguracja warstw oraz głębokość ich zalegania, a także poziom zakłóceń. W celu poprawienia technicznych warunków kartowania należy zwiększyć moc źródła, rozmiar pętli nadawczej (do 1000 m) lub w trudnych warunkach geologicznych zastosować wersję LoTEM metody procesów przejściowych. W tej wersji możliwe jest uzyskanie większego zasięgu głębokościowego. Na przykład w strefie otworu Genpeg-62 zasięg głębokościowy przy dużym poziomie zakłóceń może wynieść nawet 1180 m (Klityński & Targosz 2011, wzór (6)). Podsumowując, należy stwierdzić, że w badanym rejonie i warunkach występowania złoża do poprawnego wykartowania struktur złożowych wysokooporowych wystarczy zastosować metodę TDEM w wersji MulTEM dla pętli nadawczej $L = 1000$ m i prądu 30 A nawet przy dużym poziomie zakłóceń.

INTERPRETACJA 1D OCCAMA KRZYWYCH SONDOWAŃ TDEM

Interpretacja ilościowa krzywych sondowań TDEM umożliwia wykrywanie warstw mogących zawierać złoża ropy i gazu. Pułapka złożowa ujawnia się jako warstwa wysokooporowa. W przypadku otworu Humniska Brzozów-7 warstwa ta występuje na głębokości 815 m i ma miąższość około 150 m. W metodzie procesów przejściowych stosowana jest głównie interpretacja jednowymiarowa (1D). Najbardziej obiektywna jest metoda Occama, która będzie tutaj zastosowana (Constable *et al.* 1987).

Wyniki interpretacji metodą Occama mogą być przedstawione oddzielnie dla poszczególnych krzywych sondowań TDEM w postaci rozkładu oporności z głębokością. Specyfika metody Occama nie pozwala na uzyskanie ostrych granic geoelektrycznych – granice te są rozmyte. Dlatego najlepszą formą przedstawiania wyników interpretacji 1D metodą Occama jest zobrazowanie w postaci 2D przekroju rozkładu oporności wzdłuż profilu. Identyfikacja geologiczna granic dokonywana jest na podstawie danych elektrometrii otworowej, w tym przypadku przy wykorzystaniu otworu Humniska Brzozów-7.

Dane pomiarowe zostały zarejestrowane przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych Sp. z o.o. w Warszawie. Do rejestracji wykorzystano aparaturę V8 firmy Phoenix Geophysics Ltd. z pętlą nadawczą o rozmiarze $L = 1000$ m, przy natężeniu prądu ok. 30 A i czterech częstotliwości nadajnika: 0.125 Hz, 0.25 Hz, 1 Hz i 5 Hz. Uzyskano w ten sposób krzywe sondowań TDEM w przedziale czasowym 0.536–1705 ms. Z uwagi na silne zakłócenia wywołane przez linię elektryczną przy założeniu średniej oporności ok. $7 \Omega \cdot \text{m}$ (dane otworowe, Fig. 2) zasięg głębokościowy wynosi ok. 1000 m. Uzasadniona jest więc interpretacja krzywych sondowań w aspekcie rozpoznania głębokości zalegania warstwy wysokooporowej występującej w otworze Humniska Brzozów-7 na głębokości ok. 815 m.

Przy ustalaniu modelu wyjściowego do interpretacji 1D Occama wykorzystano dane elektrometrii otworowej z otworu Humniska Brzozów-7. Na podstawie danych elektrometrii otworowej z tego otworu wyliczono krzywą syntetyczną sondowania TDEM i wykonano interpretację 1D Occama (Fig. 6). Wyinterpretowane zostały dwie warstwy: niskooporowa, leżąca płycej, i wysokooporowa, związana ze strefą złożową.

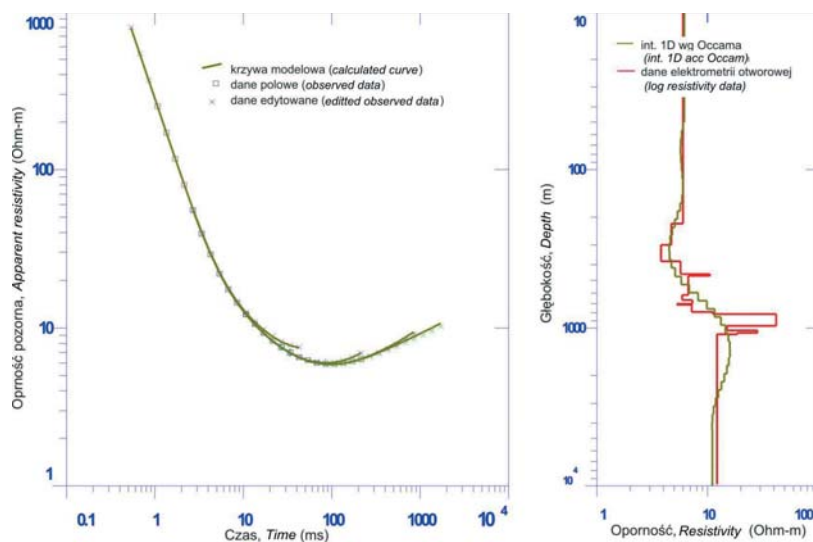


Fig. 6. Rezultat inwersji 1D metodą Occama krzywej syntetycznej sondowania TDEM uzyskanej z danych elektrometrii otworowej z otworu Humniska Brzozów-7 (rozmiar pętli nadawczej $L = 1000$ m) (lokalizacja – Fig. 1)

Fig. 6. Results of 1D Occam inversion of synthetic TDEM sounding curve (transmitter loop $L = 1000$ m) for electric log data from the Humniska Brzozów-7 borehole (location – see Fig. 1)

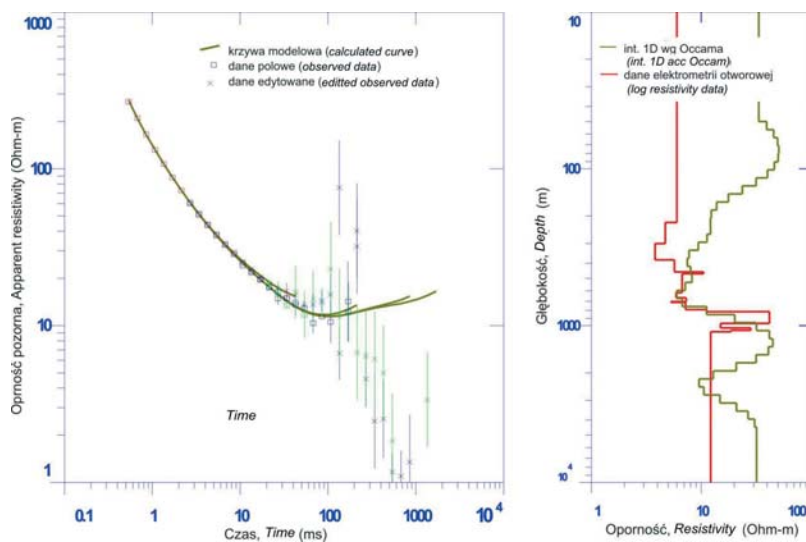


Fig. 7. Rezultat inwersji 1D metodą Occama krzywej G4B_13 sondowania TDEM na tle danych elektrometrii otworowej z otworu Humniska Brzozów-7 (lokalizacja – Fig. 1)

Fig. 7. Results of 1D Occam inversion of G4B_13 TDEM sounding curve at the background of electric log data from Humniska Brzozów-7 borehole (location – see Fig. 1)

Wykonanie interpretacji na danych syntetycznych pozwala na uzyskanie odpowiednich parametrów wyjściowych do interpretacji 1D Occama i zdobycie doświadczenia, które pozwoli na odpowiednie zobrazowanie wyników interpretacji wzdłuż profilu.

Przykład wyniku interpretacji danych polowych pojedynczego sondowania nr 13 z profilu G4B (lokalizacja – Fig. 1) przedstawia figura 7. Granica wysokooporowa jest tu rozmyta i występuje na głębokości 750–860 m. Przekrój opornościowy wykonany dla profili G4, G4A i G4B przy odpowiedniej identyfikacji granic wskazuje na antyklinalną budowę badanego obszaru (Fig. 8). Obszar złożowy występuje w postaci wyniesienia, przy czym nadkład jest niskooporowy, natomiast warstwa złożowa zaznacza się w postaci podłoża wysokooporowego.

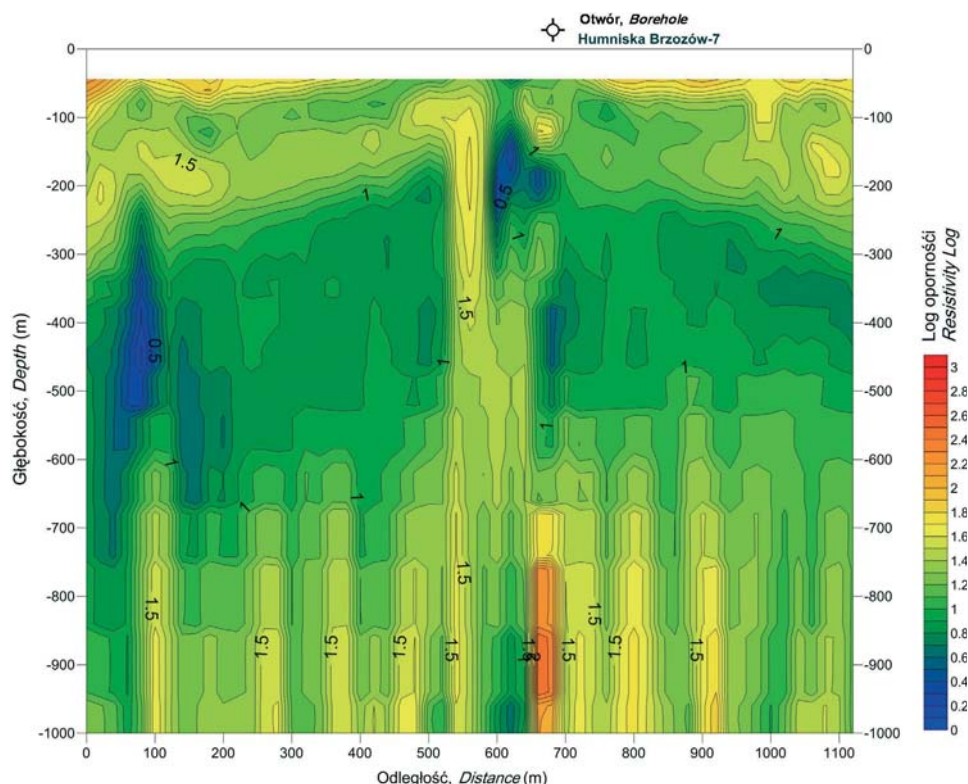


Fig. 8. Przekroje 2D rozkładu oporności wzdłuż profilu G4B

Fig. 8. Resistivity cross-section along profile G4B

INTERPRETACJA JAKOŚCIOWA DANYCH TDEM WZDŁUŻ PROFILU G4B

Pałapka gazu lub ropy naftowej, występująca w formie wysokooporowej struktury, w rzeczywistości odzwierciedla się jako wysokooporowa anomalia z obniżoną opornością

w centrum, spowodowaną rozległą mineralizacją (Klityński & Targosz 2011). Znaleźnienie obniżonej oporności w obrębie tej anomalii za pomocą interpretacji 1D metodą Occama jest bardzo trudne i zależy od jakości danych. Krzywe sondowań w metodzie procesów przejściowych są często zakłócone, szczególnie wtedy, gdy czas rejestracji jest długi. To ogranicza zasięg głębokościowy i utrudnia interpretację głębszych warstw. Efekt obniżenia oporności w centrum złoża zaznacza się natomiast na krzywych rozkładu oporności pozornej (krzywe profilowań oporności pozornej) (Tasci & Zordan 2009). W przypadku profilu G4b dla czasu 42.5 ms (strefa nad złożem) uzyskujemy anomalię ujemną (Fig. 9). Przy założeniu średniej oporności nadkładu, wynoszącej $7 \Omega\cdot\text{m}$, odpowiada to zasięgowi głębokościowemu ok. 400 m. Gdy czasy rejestracji wynoszą 84.5 ms i 107 ms zasięg głębokościowy wynosi odpowiednio ok. 540 m i ok. 610 m. Rozkłady oporności pozornej (ujemne anomalie, Fig. 9) wskazują na strefę warstw nadległych (III) (Klityński & Targosz 2011) na tych głębokościach. Dla czasu 170 ms zasięg głębokościowy wynosi ponad 800 m. Jest to głębokość zalegania warstwy wysokooporowej złożowej, co odzwierciedla krzywa profilowa oporności pozornej (Fig. 9). Dla czasu 213 ms rozkład oporności pozornej z niewielką anomalią dodatnią odpowiada warstwie znajdującej się poniżej warstwy złożowej (Fig. 9).

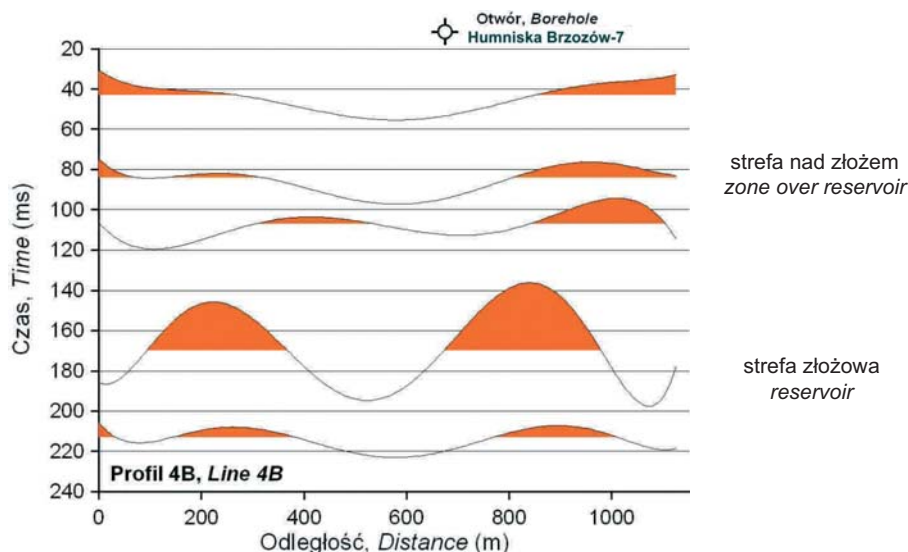


Fig. 9. Krzywe profilowań oporności pozornej dla profilu G4B (dane polowe)

Fig. 9. Apparent resistivity cross-section across profile G4B (field data)

Również rozkład przewodnictwa wzdłużnego charakterystyczny dla warstw nadległych i złożowych wzdłuż profilu może wskazywać na strefę złożową (Tasci & Zordan 2009). W centralnej części złoża, z uwagi na mineralizację, przewodnictwo wzdłużne maleje, wykazując anomalię ujemną (Klityński & Targosz 2011). Ujemna anomalia przewodnictwa wzdłużnego, uzyskana z interpretacji 1D Occama z głębokości 400–950 m wzdłuż profilu G4B, jest związana z występowaniem strefy złożowej (Fig. 10).

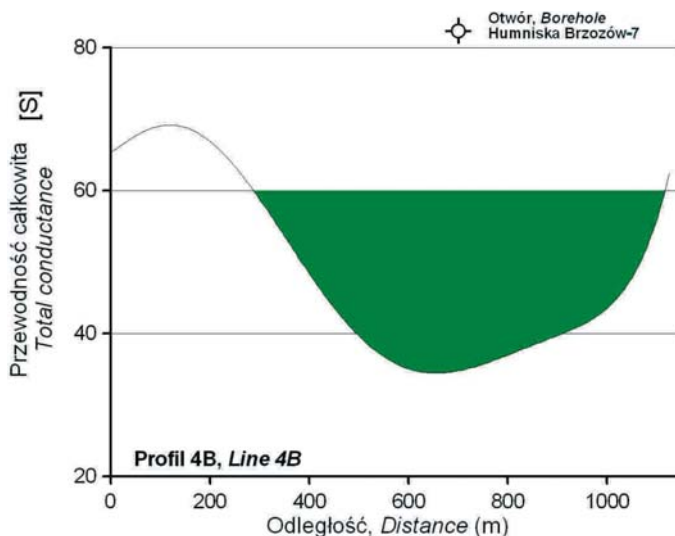


Fig. 10. Rozkład przewodnictwa wzdłużnego wzdłuż profilu G4B (z przedziału głębokości 400–950 m)

Fig. 10. Total conductance along profile G4B (depth range of 400–950 m)

PODSUMOWANIE

Rezultaty obliczeń krzywych sondowań metodą procesów przejściowych dostarczyły informacji pozwalających określić możliwości kartowania warstw wysokooporowych, interesujących z uwagi na złoża węglowodorów występujące w Karpatach Wschodnich w Polsce (rejon Grabownica Starzeńska – Humniska – Brzozów) (Fig. 1). Warstwy te związane z wysokooporowymi utworami kredy dolnej znajdują się na głębokościach powyżej 700 m p.p.t. Dane elektrometrii otworowej czterech wybranych otworów umożliwiły konstrukcję modeli geoelektrycznych (Fig. 2, 3). Wraz z warstwami nadległymi i niżej leżącymi warstwa wysokooporowa o miąższości od kilkudziesięciu do ok. 200 m (częściej) tworzy model geoelektryczny w przybliżeniu trójwarstwowy, z niskooporowym nadkładem i niskooporową warstwą niżej leżącą o dużej miąższości, co jest związane z głębokim zaleganiem podłoża struktur Karpat w tym rejonie (Stefaniuk 2003).

W pracy tej wykonano obliczenia krzywych sondowań w zakresie czasowym 0.4–1000 ms z wykorzystaniem danych elektrometrii otworowej (Fig. 4, 5). Następnie na podstawie danych otworowych zmodyfikowano krzywe sondowań i przedstawiono je w zakresach czasowych uwzględniających możliwości techniczne aparatury firmy Phoenix Geophysics Ltd. (Fig. 4B, C, 5B, C). Maksymalny czas rejestracji uwarunkowany został przez własności geoelektryczne ośrodka, poziom zakłóceń i techniczne możliwości aparatury Phoenix. Podstawowe znaczenie przy interpretacji struktur wysokooporowych ma ich miąższość, głębokość zalegania i oporność warstw nadległych. Im niższa oporność warstw nadległych, tym większe jest tłumienie impulsu elektromagnetycznego. W rozpatrywanym przypadku oporność ta wynosi ok. $7 \Omega \cdot \text{m}$ (i więcej), dzięki czemu możliwa jest interpretacja

granic wysokooporowych na głębokościach do 1000 m przy zastosowaniu metody TDEM w wersji MulTEM z pętlą nadawczą $L = 1000$ m i prądem źródłowym 30 A.

Krzywa syntetyczna policzona na podstawie danych z otworu Humniska Brzozów-7 (Fig. 1) w przedziale czasowym 0.536–213 ms i przy dużej pętli nadawczej (1000 m) została scharakteryzowana pod kątem możliwości kartowania warstwy wysokooporowej występującej na głębokości ok. 800 m (Fig. 6). Z interpretacji 1D metodą Occama krzywej syntetycznej uzyskanej na podstawie danych elektrometrii otworowej z otworu Humniska Brzozów-7 (Fig. 1) wynika, że możliwe jest określenie głębokości jej występowania (Fig. 6). Silne zakłócenia w obszarze badań ograniczyły zakres czasowy danych TDEM praktycznie do 213 ms (w sporadycznych przypadkach więcej) i w takim zakresie interpretacja 1D metodą Occama wzdłuż profilu G4B (Fig. 1) została przeprowadzona (Fig. 7). Wyniki zestawione w postaci przekroju opornościowego wskazują na to, że strop kompleksu wysokooporowego znajduje się na głębokości ok. 800 m i więcej, tworząc czapę złoża, zalegającą najpłycej w centrum profilu (Fig. 8). Wyniki interpretacji ilościowej metodą Occama uzupełniono o interpretację jakościową krzywych profilowań oporności pozornej wykonanych dla różnych czasów odpowiadających różnym głębokościom penetracji. Charakterystyczna dodatnia anomalia z minimum w centrum związana jest ze złożem, a ujemna anomalia ze strefą niskooporową nad złożem (Fig. 9). Na obecność złoża wskazuje również obniżenie przewodnictwa wzdłużnego w centrum złoża (Fig. 10).

Jak widać, możliwe jest określenie strefy złożowej (ropy i gazu) na głębokości do ok. 1000 m przy użyciu metody TDEM. Należy stosować duże pętle nadawcze (L min. 500 m, a nawet 1000 m). Interpretacja ilościowa przedstawiona w postaci przekroju pseudodwuwymiarowym rozkładu oporności (Fig. 8) oraz interpretacja jakościowa w postaci krzywych profilowań oporności pozornej i rozkładu przewodnictwa wzdłużnego tworzą spójny obraz. Tak wykonana interpretacja danych w metodzie procesów przejściowych pozwala na wskazanie stref wysokooporowych na głębokościach nieprzekraczających 1000 m w rejonie Karpat Wschodnich. Strefy te mogą wskazywać potencjalne obszary występowania węglowodorów.

Prezentowana praca została wykonana w czasie realizacji projektu badawczo-rozwojowego nr 13102 pt. „Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Inicjatywy Technologicznej I umowa nr 162/R/T02/2007/IT1. W artykule wykorzystano wyniki badań metodą procesów przejściowych wykonanych w ramach realizacji tego projektu przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w Warszawie.

LITERATURA

- Constable S.C., Parker R.L. & Constable C.G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 3, 289–300.

- Klityński W. & Targosz P., 2011. Podstawy metody procesów przejściowych i możliwości jej zastosowania w wykrywaniu złóż węglowodorów. *Geologia* (kwartalnik AGH), 37, 1, 89–111.
- Stefaniuk M., 2003. Regionalne badania magnetotelluryczne w polskich Karpatach wschodnich, *Geologia* (kwartalnik AGH), 29, 3–4, 131–168.
- Tasci M.T. & Zordan J.M., 2009. *Case Histories Using the Time Domain Electromagnetic Sounding Method in Oil and Gas Exploration*. StrataSearch Corporation, Golden, CO, [on-line:] <http://www.stratasearchcorp.com/case-hist.htm> (dostęp: 20.01.2009).

Summary

A number of important information obtained as a result of TDEM data interpretation motivated us to study the TDEM capabilities to map high-resistivity structures from Polish Eastern Carpathians (Grabownica Starzeńska – Humniska – Brzozów area) (Fig. 1) that could be prospective for oil and gas industry. The structures are connected with high-resistivity Lower Cretaceous layers resting at a depth of below 700 m b.g.l. Geoelectric models were constructed based on electric log data from four chosen boreholes (Figs 2, 3). A high-resistivity layer with a thickness ranging from a few dozen to two hundred meters, overlain by a low-resistivity overburden and underlain by a low-resistivity of big thickness layer, make an approximate three-layer model (Stefaniuk 2003).

This paper presents synthetic TDEM sounding curves for a time range of 0.4 to 1000 ms for electric log data (Figs 4, 5). The sounding curves were modified by changing the time range allowing for technical specifications of the Phoenix Geophysics Ltd. equipment (Figs 4B, C, 5B, C). The maximum recording time was defined by resistivities of the geological medium, noise level and technical capacities of Phoenix Geophysics Ltd. equipment. Of basic importance to interpretation of high-resistivity structures was their thickness and depth of burial and resistivity of overlaying layers. The lower overlying layer resistivity, the higher attenuation. In our case study, the resistivity is $7 \Omega\cdot\text{m}$ and more and this makes it possible to make an effective interpretation of high-resistivity horizons at a depth to about 1000 meters.

Based on electric log data from the Humniska Brzozów-7 borehole, a synthetic sounding curve was calculated for a time range 0.536–213 ms and a big transmitter loop, $L = 1000$ m (Fig. 6). That synthetic curve was analyzed in terms of interpretation of a high-resistivity horizon located at a depth of about 800 meters. It can be seen that it is possible to interpret a depth of the high-resistivity horizon from 1D Occam interpretation (Fig. 6). As a result of strong noise, the time range of TDEM data was limited to 213 ms and hence the 1D Occam interpretation of TDEM sounding curves along profile G4B was bound to that range (Fig. 1) (e.g. Fig. 7, sounding G4B_13). The resistivity cross-section shows that the high-resistivity horizon occurs at a depth of about 800 meters creating there a cap-rock, which rests deepest in the centre of profile G4B (Fig. 8). In addition to the Occam interpretation, the qualitative interpretation was made, which included apparent resistivity profiling curves for different times corresponding to different penetration depths. A characteristic positive anomaly with the minimum in the centre corresponds to a high-resistivity layer (with a gas

deposit) while a negative anomaly is connected with a low-resistivity zone over the deposit (Fig. 9). A negative anomaly of total conductance along profile G4B can be considered as a hydrocarbon trap indicator (Fig. 10).

As it can be seen, it is possible to determine a hydrocarbon reservoir at a depth to about 1000 m with the use of the TDEM method. It is necessary to use big transmitter loops (minimum 500 m, better 1000 m). Results of the quantitative interpretation presented as a pseudo 2D resistivity cross-section (Fig. 8) and the qualitative interpretation in the form of apparent resistivity cross-section and total conductance distribution give a coherent image. With great likelihood, such an integrated interpretation of TDEM data can indicate hydrocarbon deposits at a depth of maximum 1000 m in Polish Eastern Carpathians.